

実物大重錘衝突実験による緩衝装置を用いたポケット式落石防護網の評価

Evaluation of pocket-type rockfall protection nets using shock absorbers by full scale weight impact tests

田島 与典*, 前川 幸次**, 岩崎 征夫***, 河上 康太****
 Tomonori Tajima, Koji Maegawa, Masao Iwasaki, Kota Kawakami

*金沢大学大学院博士後期課程, 自然科学研究科 環境科学専攻 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

** 工博, 教授, 金沢大学理工研究域 環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

***所長, (株) ライテック福岡事務所 (〒812-0039 福岡県福岡市博多区冷泉町)

****金沢大学大学院博士前期課程, 自然科学研究科 社会基盤工学専攻 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

Rockfall protection fences and pocket-type rockfall protection nets are economical and easy to construct because they use lightweight materials, such as nets. On the other hand, they can only handle 50-200 kJ of energy resulting from rockfall, which restricts the locations where they can be used. If their ability to handle more energy could be increased, they could be used in more locations. This research involved conducting performance tests of shock absorbers, and drop-weight impact tests using a full-scale model —of which there few examples in Japan— with the objective of evaluating the performance of pocket-type rockfall protection nets equipped with shock absorbers.

Key Words: rockfall, pocket-type rockfall protection net, shock absorber, weight impact test

キーワード: 落石, ポケット式落石防護網, 緩衝装置, 重錘衝突実験

1. はじめに

我が国は, 国土の約 70%を急峻な山地丘陵が占め, 脆弱な地質構造の上に成り立っている. また, 降雨量が多く, 国土の約半分は豪雪地帯であるうえ, 世界有数の火山国, 地震国である. このように, 極めて厳しい自然条件にある我が国では, 落石, 雪崩, 土砂崩壊などの斜面災害対策が重要な課題となっている.

落石災害については, 平成 21 年 7 月に富士山で発生した落石死亡事故が記憶に新しく, このような落石災害から人命を守るため, 様々な落石対策工が施されている.

落石対策工は, 落石の発生を未然に防止する落石予防工と, 発生した落石を防護対象物に影響のない位置で停止させる, あるいは下方または側方へ誘導させる落石防護工に大別される. また予防工と防護工それぞれの工種は, さらに細分化される¹⁾.

このように, 多岐におよぶ落石防護工の中で, 図-1 に示すような, 斜面中腹あるいは下方へ線的に配置して落石を待ち受ける落石防護柵と, 斜面中腹から下方を面的に覆って落石を受け止め, 下方へ誘導するポケット式落石防護網の 2 形式が多く用いられている. これらは, H 形鋼や金網, ワイヤロープなどの汎用材料を用いてい



図-1 落石防護柵(写真左), 落石防護網(写真右)

ることから, 経済性と施工性に優れている反面, 材料強度の限界などから, 対応可能な落石エネルギーは 50~200kJ 程度と小さく, 適用できる箇所が限定される. したがって, 何らかの方法でこの 2 形式の落石対応能力を高めることができれば, より多くの落石危険箇所の対策工として寄与できるものと考えられる.

落石防護構造の先進地である欧州では, リングネット落石防護柵をはじめ, 変形性能に優れたネット, ブレーキリング(緩衝装置)などを用いて, 構造体を変形させることで, 落石エネルギーの吸収性能を高めた柔構造型の落石防護柵が主流となっている. 近年我が国でも同様に, 緩衝装置などを構造体に組み込んだ, いわゆる高エ

表－1 緩衝装置の諸元

型式	記号	部品名称	材質	規格	ワイヤロープ種別
U ボルト型式	Parts-A	本体部品	鋼	S-25C	3×7 G/O 18φ
	Parts-B	高力六角ボルト		F8T-M20	
		六角ナット			
		平座金			
	Parts-C	ストッパー	可鍛鋳鉄	FCMB27-05	
	Parts-D	U ボルト	鋼	SS400	
Parts-E	プレート	SS400			
リング型式	Parts-A	本体部品	アルミニウム合金鋳物	S-25C	6×24 G/O 16φ
	Parts-B	ストッパー		S-25C	
	Parts-C	キック防止金具		AC4C.1	
	Parts-D	高力六角ボルト	鋼	F8T-M16	
		六角ナット			
		平座金			

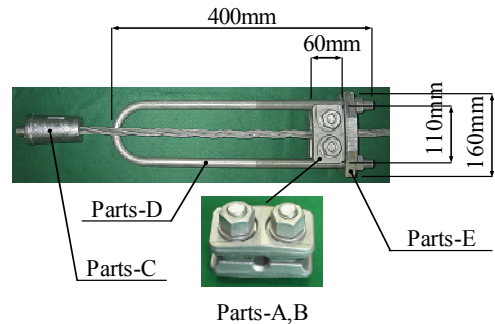
エネルギー吸収型と呼ばれる落石防護柵の研究開発が進められ、部材単体の性能確認実験や実物大モデルでの実証実験、動的解析などによって、一定の評価が得られている^{2), 3)}。

一方、ポケット式落石防護柵について、高エネルギー吸収型の構造体は皆無でないものの、研究開発が進んでいるとは言い難い。また、実物大モデルを用いた実証実験により、その性能を評価した事例も少ない。これは、落石防護柵が線的に構成されるのに対して、ポケット式落石防護柵は面的に構成されるため、実物大モデルを製作するにあたり、あらゆる面で制約を受けることが理由のひとつとしてあげられる。

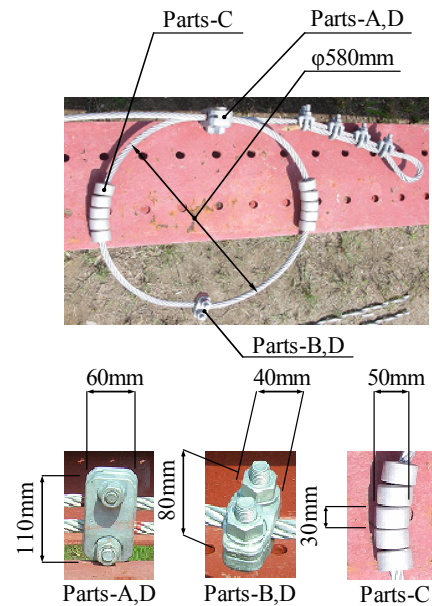
従来型のポケット式落石防護柵は、落石の直撃を受ける金網と横ワイヤロープ、横ワイヤロープの端部を地盤へ定着するアンカーへの負荷が大きく、これらの部材が弱点となり、大きな落石エネルギーに対応できない。このことから単純に考えれば、落石荷重に対して破断しないように金網やワイヤロープの部材強度を高めると同時に、これらを支える支柱を強化することで、高エネルギー吸収は可能となり得る。ただし、部材重量の増加に伴う施工性や経済性の低下、市場性に乏しい材料を用いることによる材料の入手性や経済性の低下が懸念される。また、横ワイヤロープや支柱の部材強度を高めた場合、これらを地盤に定着するアンカーの作用力が大きくなることも考慮する必要がある。

これまで著者らは、緩衝装置を有する落石防護柵の研究開発を行ってきた経験から、緩衝装置の有効性について一定の評価を得ており、ポケット式落石防護柵に緩衝装置を用いることで、横ワイヤロープならびにアンカーへの作用力を抑制するとともに、高エネルギー吸収化を実現できるものと考えた。

本研究では、緩衝装置を用いたポケット式落石防護柵の性能について評価することを目的として、緩衝装置単体の性能確認実験、ならびに国内では事例が少ない実物大モデルを用いたポケット式落石防護柵の重錘衝突実験を行った。



図－2 U ボルト型式の緩衝装置



図－3 リング型式の緩衝装置

2. 緩衝装置単体の性能確認実験

2.1 緩衝装置

表－1 は、緩衝装置の諸元を、図－2 と図－3 は、緩衝装置の形状寸法を示している。緩衝装置は、落石衝突時における衝撃を緩和し、落石の運動エネルギーを吸収する特徴を有するとともに、ワイヤロープの破断やアンカーの損傷を防止する効果が期待できる。

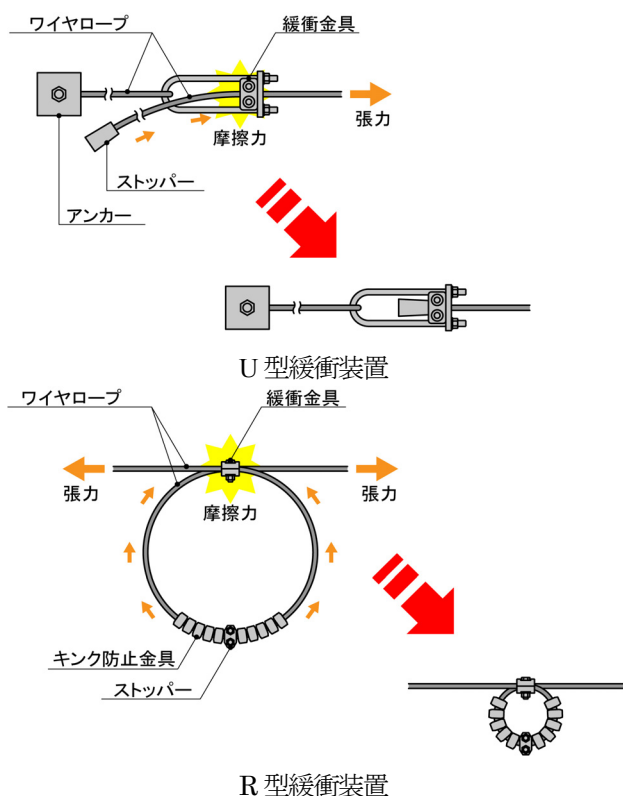


図-4 緩衝装置のスリップ吸収機構

本研究で用いた緩衝装置は、2枚の鋳造板で構成される本体部品でワイヤロープを挟み込み定着する形式である。この緩衝装置は、ワイヤロープに一定以上の張力が作用するとワイヤロープが滑り始め、ワイヤロープ表面と本体部品内面との間に生じる摩擦力によってワイヤロープが制動される。この摩擦抵抗によって、エネルギーが吸収される仕組みであり、これをスリップ吸収機構と呼ぶこととする。

緩衝装置単体の基本性能を確認するための性能確認実験は、2形式について行った。1つはUボルトに本体部品を取り付けるUボルト型式（以降、U型という）である。U型の緩衝装置は、所定の滑り長を確保したワイヤロープを本体部品で挟み込み、本体部品の合わせ面が密着するまで高力六角ボルトで締め付けて固定する。合わせ面の密着度確認は、スキマゲージ（0.5mm）を挿入、横方向にスライドさせて抵抗を示せばほぼ一定の滑り張力が得られるように考案されている。このため、高力六角ボルトの厳密な締め付け管理は不要であるが、合わせ面が密着するまでの締め付けトルク値は、300～400N・m程度を目安とする。本体部品の孔径は、合わせ面が密着した状態でφ18mm（ワイヤロープ公称径）より若干小さくしている。また、ワイヤロープ径について、JISでは公称径10mm以上の許容差を公称径+7%、-0%と規定しており、ワイヤロープの実径は公称径より大きい。なお、本体部品の孔径とワイヤロープ径の関係により、ワイヤロープの滑り量や平均張力は変わってくるが、これらを数値的に把握するまでには至っていない。もう1

つはリング状に巻いたワイヤロープに本体部品を取り付けるリング型式（以降、R型という）である。R型の緩衝装置は、所定の径を確保してリング状に巻いたワイヤロープを本体部品で挟み込み、本体部品の合わせ面が密着するまで高力六角ボルトで締め付けて固定する。合わせ面の密着度確認の方法、締め付けトルク値の目安はU型と同じであり、本体部品の孔径は、合わせ面が密着した状態でφ16mm（ワイヤロープ公称径）より若干小さくしている。またR型では、本体部品と180°となる位置にストッパーを取り付け、本体部品とストッパーの間には、ワイヤロープがスリップした際に、キンクを防止するための金具を挿入しておく。このキンク防止金具は、ワイヤロープの緊縮に追従するため、中心部が空洞となっており、自由に可動する仕組みである。

図-4は、緩衝装置のスリップ吸収機構を模式的に示している。U型は、ワイヤロープ端部にストッパーを取り付けており、設定した滑り長を超えて滑った場合でも、ワイヤロープが抜け落ちない仕組みとなっている。また、R型は、ワイヤロープのスリップにともないリング径が緊縮するが、キンク防止金具により、ワイヤロープがキンクしない径でスリップが止まるよう、制御される仕組みとなっている。

2.2 実験方法

図-5は、緩衝装置単体の性能確認実験に用いる実験装置を示している。

ワイヤロープに緩衝装置を取り付けた供試体の端部は、一端をフレームに直接固定し、他端はロードセルを介して水平となるようにフレームに固定する。固定端の間隔は、実験装置の構造上5mとなる。供試体をフレームに固定する際、初期たわみを少なくするため、緊張具で約2kNの緊張力を与える。供試体を実験装置に固定した後、供試体中央へ所定の質量の重錘を、鉛直に自由落下させて衝突させる。この時の衝撃荷重は、緩衝装置が作動する大きさとする必要がある。また、緩衝装置内をワイヤロープが滑る時の純粋な滑り張力を得るためには、緩衝装置内をワイヤロープが抜け出してはならず、設定した滑り長以内で重錘が停止する必要がある。

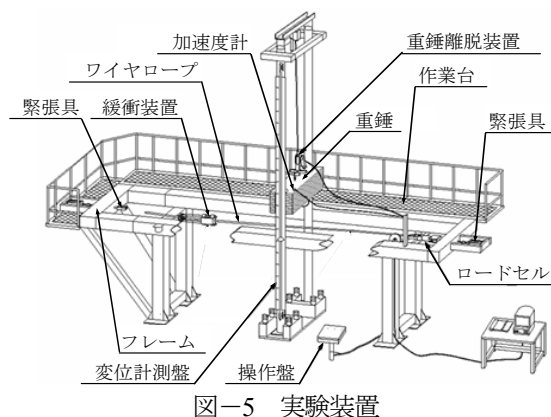


図-5 実験装置



重錘落下前



重錘落下後

図－6 実験状況

重錘落下時には、重錘に取り付けた加速度計により重錘が停止するまでの加速度の経時変化を測定する。同時に、ワイヤロープ張力ならびに重錘変位の経時変化を、ロードセルと変位計によりそれぞれ測定する。これらの値の測定は、センサーからの出力を 0.25ms 間隔でサンプリングした。重錘停止後は、ワイヤロープの滑り量をスケールで測定する。

前述のとおり、緩衝装置は、ワイヤロープに一定値以上の張力が作用すると、滑り始めるように考案されている。したがって、重錘の衝突エネルギーが大きければ、ワイヤロープはほぼ一定の張力を保持したまま滑り量のみが増加し、緩衝装置が重錘の運動エネルギーを吸収した段階で重錘は停止する。

本実験では、重錘が供試体に衝突する時のエネルギーを、U 型で 10.51kJ（質量 1.34t、落下高 0.8m）、R 型で 6.57kJ（質量 1.34t、落下高 0.5m）とした。

緩衝装置単体の性能確認実験の状況を示す図－6 において、重錘の先端に滑車を取り付けている。この滑車により、重錘先端と供試体の摩擦を避けるとともに、ワイヤロープの滑り運動を阻害せずに重錘を鉛直に落下させる仕組みとなっている。

2.3 実験結果と考察

緩衝装置単体の性能確認実験は、U 型と R 型の供試体

表－2 U 型の性能確認実験結果

No.	重錘 質量 (ton)	重錘 落下高 (m)	重錘 変位 (m)	重錘 (位置) エネルギー (kJ)	ワイヤ ロープ 滑り量 (m)	ワイヤ ロープ 平均張力 (kN)
1	1.34	0.80	2.63	34.54	1.050	32.90
2	1.34	0.80	2.67	35.06	1.140	30.75
3	1.34	0.80	2.69	35.33	1.120	31.54
4	1.34	0.80	2.71	35.59	1.150	30.95
5	1.34	0.80	2.58	33.88	1.030	32.89
平均			2.66	34.88	1.100	31.81
標準偏差			0.052	0.681	0.054	1.036

表－3 R 型の性能確認実験結果

No.	重錘 質量 (ton)	重錘 落下高 (m)	重錘 変位 (m)	重錘 (位置) エネルギー (kJ)	ワイヤ ロープ 滑り量 (m)	ワイヤ ロープ 平均張力 (kN)
1	1.34	0.50	2.08	27.31	0.995	27.45
2	1.34	0.50	2.12	27.84	1.020	27.29
3	1.34	0.50	2.08	27.31	0.950	28.75
4	1.34	0.50	2.03	26.66	0.910	29.30
5	1.34	0.50	2.01	26.40	0.930	28.39
平均			2.06	27.10	0.960	28.24
標準偏差			0.044	0.574	0.046	0.856

をそれぞれ 5 体、全 10 ケースについて行った。

表－2 および表－3 は、それぞれ U 型の実験結果および R 型の実験結果を示している。表において、重錘落下高は、落下開始前の重錘底面から供試体（ワイヤロープ）上面までの高さであり、重錘変位は、落下開始前の重錘底面から重錘停止位置での重錘底面までの高さ（重錘移動距離）である。また、重錘が失う位置エネルギーを重錘エネルギーと呼ぶとき、(1)式で得られる。

$$E = m \cdot g \cdot H \quad (1)$$

ここに、 E ：重錘エネルギー(kJ)

m ：重錘質量(ton)

g ：重力加速度(9.8m/s²)

H ：重錘変位（重錘移動距離，m）。

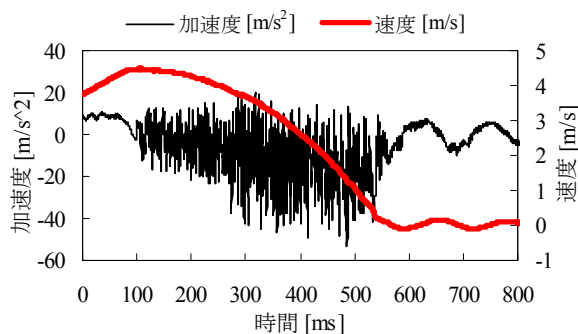
ワイヤロープ滑り量は、重錘が供試体に衝突し停止するまでの間に、緩衝装置内を滑ったワイヤロープの長さである。(1)式で得た重錘エネルギーとワイヤロープの滑り量より、緩衝装置内を滑る時のワイヤロープの平均張力は、(2)式で得られる。この平均張力は、緩衝装置を用いた落石防護構造を検討するにあたり、緩衝装置単体のエネルギー吸収量を求める際に用いる。

$$\bar{T} = E / l \quad (2)$$

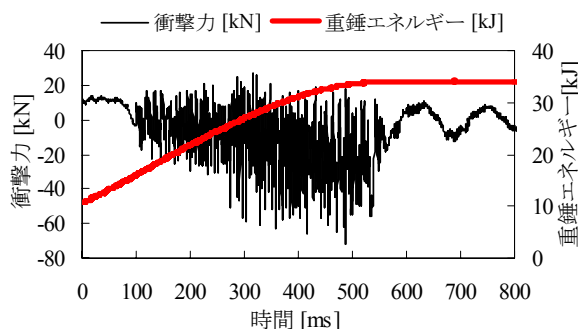
ここに、 \bar{T} ：ワイヤロープ平均張力(kN)

E ：重錘エネルギー(kJ)

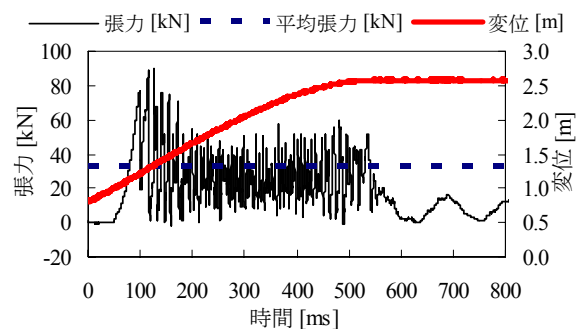
l ：ワイヤロープ滑り量(m)。



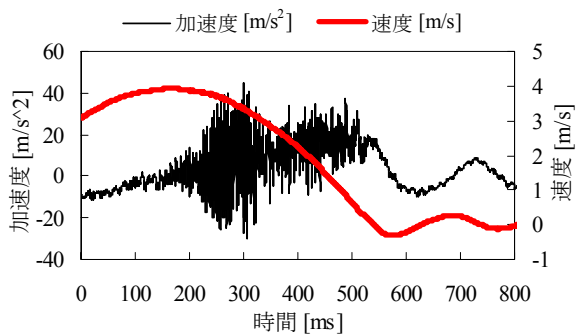
(a) 重錘加速度と重錘速度の経時変化



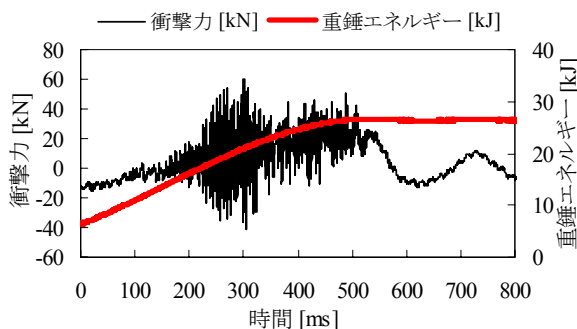
(b) 重錘衝撃力と重錘エネルギーの経時変化



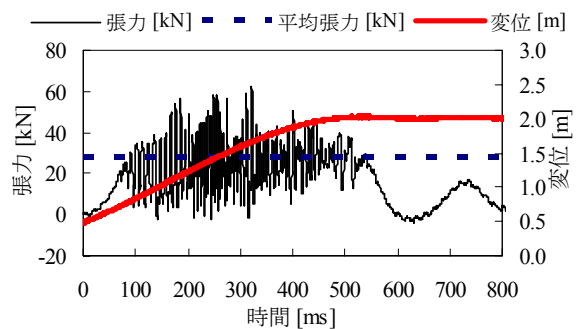
(c) ワイヤロープ張力と重錘変位の経時変化
図-7 U型の測定結果 (No.5)



(a) 重錘加速度と重錘速度の経時変化



(b) 重錘衝撃力と重錘エネルギーの経時変化



(c) ワイヤロープ張力と重錘変位の経時変化
図-8 R型の測定結果 (No.5)

図-7、図-8 は、U 型ならびに R 型の測定結果の 1 例として、それぞれ実験ケース No.5 について示している。グラフの時間軸について、0ms は便宜上の時刻であり、重錘が供試体に衝突した時刻は、U 型が約 50ms、R 型が約 0ms である。各グラフは、次の関係についてまとめている。

(a) 重錘加速度と重錘速度の経時変化

重錘加速度は、重錘に取り付けた加速度計による測定値である。重錘速度は、重錘加速度を時間で積分して得られる。

(b) 重錘衝撃力と重錘エネルギーの経時変化

重錘衝撃力は、重錘加速度と重錘質量の積から得られる。重錘エネルギーは、前述の(1)式で得られる。

(c) ワイヤロープ張力と重錘変位の経時変化

ワイヤロープ張力は、ロードセルによる測定値である。

重錘変位は、変位計による測定値である。また、平均張力は、前述の(2)式で得られる。

(1) 緩衝装置の精度

U 型については、表-2 に示す実験結果より、重錘変位は、2.58～2.71m の範囲にあり、平均値は 2.66m、標準偏差は 0.052 である。重錘エネルギーは、33.88～35.59kJ の範囲にあり、平均値は 34.88kJ、標準偏差は 0.681 である。ワイヤロープの滑り量は、1.030～1.150m の範囲にあり、平均値は 1.100m、標準偏差は 0.054 である。ワイヤロープに作用する平均張力は、30.75～32.90kN の範囲にあり、平均値は 31.81kN、標準偏差は 1.036 である。

R 型については、表-3 に示す実験結果より、重錘変位は、2.01～2.12m の範囲にあり、平均値は 2.06m、標準偏差は 0.044 である。重錘エネルギーは、26.40～27.84kJ の範囲にあり、平均値は 27.10kJ、標準偏差は 0.574 であ

る。ワイヤロープの滑り量は、0.910～1.020m の範囲にあり、平均値は 0.960m、標準偏差は 0.046 である。ワイヤロープに作用する平均張力は、27.29～29.30kN の範囲にあり、平均値は 28.24kN、標準偏差は 0.856 である。

U 型および R 型の実験結果は、ばらつきが比較的小さく、双方の緩衝装置ともに、安定した性能を示すことがわかった。

(2) 緩衝装置の精度

U 型については、表-2 に示す実験結果より、重錘変位は、2.58～2.71m の範囲にあり、平均値は 2.66m、標準偏差は 0.052 である。重錘エネルギーは、33.88～35.59kJ の範囲にあり、平均値は 34.88kJ、標準偏差は 0.681 である。ワイヤロープの滑り量は、1.030～1.150m の範囲にあり、平均値は 1.100m、標準偏差は 0.054 である。ワイヤロープに作用する平均張力は、30.75～32.90kN の範囲にあり、平均値は 31.81kN、標準偏差は 1.036 である。

R 型については、表-3 に示す実験結果より、重錘変位は、2.01～2.12m の範囲にあり、平均値は 2.06m、標準偏差は 0.044 である。重錘エネルギーは、26.40～27.84kJ の範囲にあり、平均値は 27.10kJ、標準偏差は 0.574 である。ワイヤロープの滑り量は、0.910～1.020m の範囲にあり、平均値は 0.960m、標準偏差は 0.046 である。ワイヤロープに作用する平均張力は、27.29～29.30kN の範囲にあり、平均値は 28.24kN、標準偏差は 0.856 である。

U 型および R 型の実験結果は、ばらつきが比較的小さく、双方の緩衝装置ともに、安定した性能を示すことがわかった。

(3) ワイヤロープ張力

U 型のワイヤロープ張力は、図-7(c)に見られるように、重錘が供試体に衝突した約 50ms 直後に張力は急速に増大し、約 120ms で最大値約 90kN を示す。その後、やや減少してほぼ一定の振幅で変動し、550ms～600ms で重錘エネルギーを吸収し終わると、ワイヤロープに作用する張力は消失する傾向を示す。ここで、張力が振幅をもって変動するのは、ワイヤロープの表面に凹凸があり、緩衝装置との接触面が常に一定でないためであり、この点は、R 型も同様である。また、重錘衝突直後に最大張力が発生するのは、ワイヤロープが滑り始める時に、大きな張力を必要とすることを意味している。このことについて、U 型は、ワイヤロープを挟み込んで固定する際、ワイヤロープ 1 本を 2 本の高力六角ボルトで締め付ける構造である。故に、緩衝装置内面とワイヤロープ表面との密着性が高くなり、ワイヤロープに張力が作用し滑り始める時に、大きな摩擦抵抗が働くためと考えられる。

R 型のワイヤロープ張力は、図-8(c)に見られるように、重錘が供試体に衝突した約 0ms 直後に、張力は最大値約 60kN を示す約 320ms までの間で、振幅しながら徐々に増大する。その後、やや減少してほぼ一定の振幅で変動し、550ms～600ms で重錘エネルギーを吸収し終わる

と、ワイヤロープに作用する張力は消失する傾向を示す。ここで、重錘衝突直後に最大張力が発生する U 型に対して、R 型の挙動は明らかに異なる。このことについては、それぞれの緩衝装置で使用するワイヤロープの種別、径および表面積の相違が関係していると思われる。その他に、緩衝装置にワイヤロープを挟み込んで固定する際、2 枚の鋳造板の合わせ面が密着するまで高力六角ボルトで締め付けるが、双方の緩衝装置の構造上、U 型はワイヤロープ 1 本を 2 本の高力六角ボルトで締め付け、R 型はワイヤロープをリング状に巻いて挟み込むため、ワイヤロープ 2 本を 2 本の高力六角ボルトで締め付ける。したがって、R 型は、緩衝装置内面とワイヤロープ表面との密着性が低く、滑り始めようとする時の摩擦抵抗が小さくなるものと考えられる。

(4) 重錘加速度と重錘衝撃力

U 型の重錘加速度と重錘衝撃力は、図-7(a)および図-7(b)に見られるように、重錘が供試体に衝突した後、振幅しながら徐々に増加し、重錘エネルギーを吸収し終わると減少する傾向を示す。

R 型についても、図-8(a)および図-8(b)に見られるように、U 型とほぼ同様の傾向を示す。

(5) 重錘速度

U 型の重錘速度は、図-7(a)に見られるように、自由落下速度で重錘が供試体に衝突した後、約 100ms でピークを示す。その後、緩衝装置内をワイヤロープが滑ることによって生じる摩擦抵抗により、重錘の落下運動が制動されるとともに速度も減少を続け、重錘が停止した時点で 0 となる。

R 型については、図-8(a)に見られるように、自由落下速度で重錘が供試体に衝突した後、約 180ms でピークを示した後、U 型と同様の傾向を示す。

(6) 重錘エネルギーと重錘変位

U 型の重錘エネルギーと重錘変位は、図-7(b)および図-7(c)に見られるように、時間とともに直線的に増加し、約 500ms でほぼ一定値となる。

R 型についても、図-8(b)および図-8(c)に見られるように、U 型とほぼ同様の傾向を示す。

(7) 重錘のリバウンド現象

重錘は、最大変位に至った時点ですぐに落下運動を停止せず、リバウンドを数回繰り返す。これは、重錘の衝突対象物が、弾性体のワイヤロープであるためである。図-7 および図-8 中、約 600ms 以降で数値 0 付近を振幅する波形は、このリバウンド現象を示している。なお、約 600ms 以降における変位の線形が直線的に見えるのは、リバウンド時の最大変位が ±20-30mm 程度と小さいためであり、(1)式で得られる重錘エネルギーの線形も同様、リバウンド現象の挙動はグラフに表現されない。

3. ポケット式落石防護網の実物大重錘衝突実験

3.1 実験概要

図-9 は、標準的なポケット式落石防護網の側面図を示している。ポケット式落石防護網は、吊ロープを介して地盤に設置したアンカーへ支持させた支柱に、横方向ならびに縦方向のワイヤロープと金網を吊り下げる構造である。支柱に支持させる最上段の横主ロープには、適当な間隔で縦主ロープならびに縦補助ロープを取り付ける。なお、横主ロープは、対策を施す斜面長に応じて適当な間隔で張設し、ロープの両端を地盤に設置したアンカーへ定着させる。また、アンカーへ定着しない横補助ロープを、適当な間隔で設置する。金網は、結合コイルを用いて、縦横の主ロープならびに補助ロープに取り付ける。なお、標準的なポケット式落石防護網は、落石エネルギーの吸収に寄与する緩衝装置などの特殊な部材やシステムは用いられていない。

本研究では、前段でも述べたように、標準的なポケット式落石防護網の弱点を補い、かつ高エネルギー吸収化の実現に有効と考える緩衝装置を用いたポケット式落石防護網の特性や問題点を検討するため、実物大モデルによる重錘衝突載荷実験を行った。

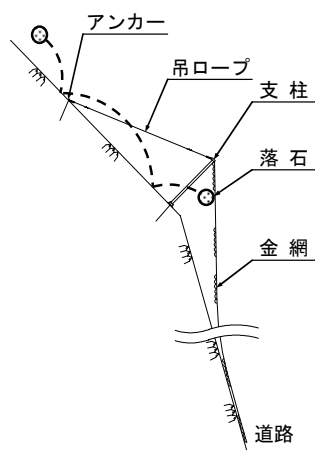


図-9 ポケット式落石防護網の構造概要

3.2 実験装置

実験装置は、図-10 に示す形状寸法の架台を用いた。ここで、実物大モデルを用いる場合の実験方法について、実構造物と同様に供試体を斜面に設置し、上方から重錘などを転落させて衝突させる、あるいは斜面に沿って設置した架台上で重錘を滑落させて衝突させる方法、平地上に供試体を設置し、上方から重錘などを鉛直に自由落下させて衝突させる方法などが、過去の実験で行われている^{4),5)}。本実験では、次の理由により、後者の方法で実験を行った。

- (a) 実験場所と実験装置の制約上の問題。
- (b) 斜面の摩擦抵抗などによる落下速度の低下がなく、所定の衝突エネルギーを確実に与えることができる。
- (c) 重錘が下方へ誘導される過程では、運動停止直前ま

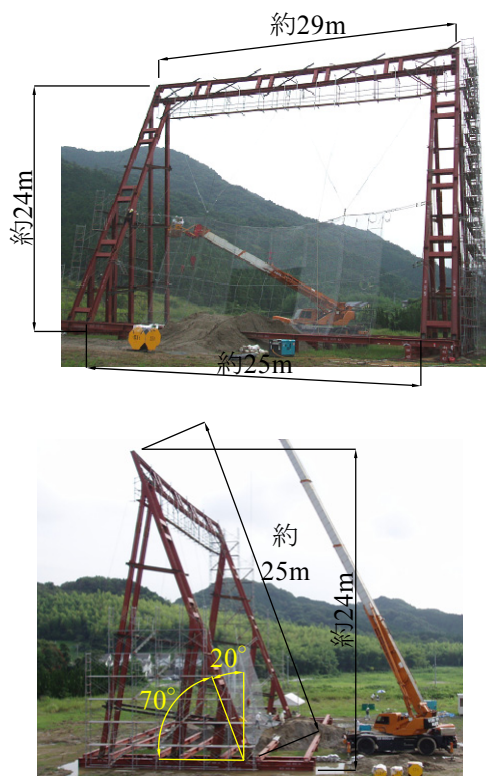


図-10 実験装置の形状寸法

で載荷状態が継続されるため、構造体の損傷度合いに対して最も不利となる。

ここで、実構造物のポケット式落石防護網は、斜面勾配が水平に対して 60～70 度の箇所へ設置されることが多い。この時、落石の落下方向と金網の衝突面がなす角度は約 20 度となる。このことから、図-10 に示すように、重錘の落下方向となる鉛直に対して、衝突面を 20 度にするため、架台の金網設置面を水平に対して 70 度で傾斜させた。ただし、落石対策便覧では、落石の衝突方向を金網の衝突面に対して水平として設計を行うこととしており、本実験の衝突方向とは一致しない。実構造物における落石の衝突方向や速度等の特性による影響については、LS-DYNA（非線形構造解析ソフト）等を用いて解析的な検討が可能である。既に筆者らは LS-DYNA により、本実験の衝突現象を再現できる解析モデルを作成しており⁷⁾、実構造物における落石の特性による影響を検討中である。

3.3 重錘

図-11 は、実験に用いた重錘の形状寸法を示している。



図-11 重錘の形状寸法

重錘は、鉄筋コンクリート製とし、質量 1700kg と 2500kg（密度 2.3 t/m^3 ）の 2 種類を用いた。重錘の形状寸法は、スイスの環境・森林・景観庁（SAEFL）における落石防護柵のガイドライン⁶⁾に準拠した。なお、重錘中心部には、3 軸加速度計を取り付けるための空間を設けている。

3.4 供試体

図-12 は、供試体の形状寸法ならびに基本構造を示している。本実験に用いた供試体構造は、従来から用いられている標準的なポケット式落石防護柵に対して、落石エネルギーの吸収性能を高めるため、独自に検討したものである。

供試体の形状寸法は、ネット高 10m、ネット幅 18m、実構造物で支柱位置となる B 点と D 点の間隔は、想定する最大支柱間隔である 12m とした。

本構造物は、図-13 に示すように、滑車装置と緩衝装置を設けていることが大きな特徴である

滑車装置は、図-12 における B、C、D 点に設けており、A、B、C、D、E 点を W 形状で結ぶ吊ロープを、1 本のワイヤロープで連続させている。これは、落石の衝突時に吊ロープの移動を円滑にし、負荷を吊り合わせると同時に、落石の衝撃力を分散させ、構造全体で落石のエネルギーを吸収する効果を期待したものである。

緩衝装置の設置について、緩衝装置単体の性能確認実験で得た設計滑り張力を用いて設計を行い、250kJ 程度までの落石エネルギーに対しては、R 型のみで吸収可能との結果を得た。したがって、衝突エネルギーが 250kJ 以下の実験ケースでは、R 型設置のみとし、250kJ を超える実験ケースでは、R 型と U 型を併用することとした。横主ロープは、高エネルギーに対応できるように、1 段につき 2 本のワイヤロープを張設している。したがって、R 型の設置箇所は、横主ロープ 1 本につき左右対称の位置となる N、O、P、Q 点に 2 箇所ずつ、全体で 8 箇所に設置した。また、U 型の設置箇所は、吊ロープ両端となる A、E 点の 2 箇所、ならびに横主ロープ両端となる F、G、H、I、J、K、L、M 点の 8 箇所、全体で 10 箇所に設置した。

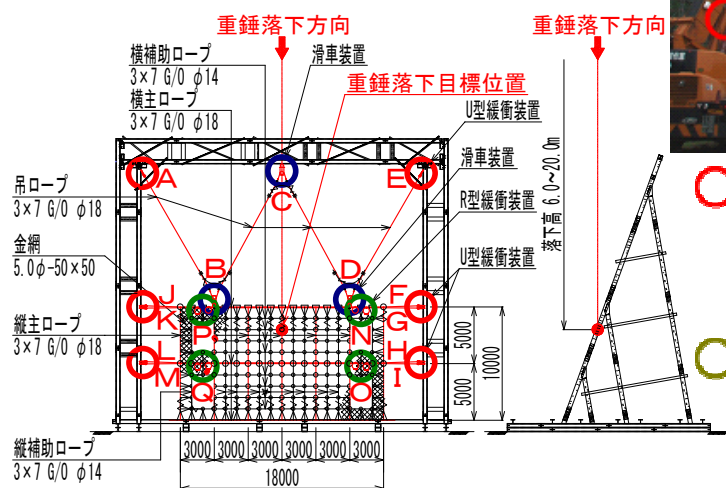


図-12 供試体の形状寸法

3.5 実験方法

実験方法は、ラフテレーンクレーンにて重錘を落下目標位置にセットした後、所定の落下高まで引き上げ、重錘の揺れが小さくなった時点で、エア式離脱装置を用いて自由落下させ、供試体に衝突させた。

測定項目と測定方法は、次のとおりとした。

(a) 重錘加速度

重錘中心部に 3 軸加速度計と記録計を設置し、センサーからの出力を 0.25ms 間隔でサンプリングした。

(b) ロープ張力

架台とロープの間に設置した U ボルトに貼付したひずみゲージ（4 ゲージ法）により測定した。

(c) 緩衝装置内のワイヤロープ滑り長

衝突後にスケールで測定した。

(d) 供試体の変形状況と重錘の挙動

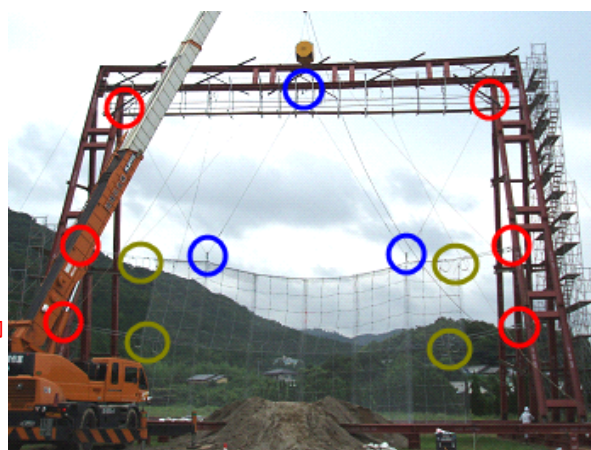
高速度カメラを用いて毎秒 200 コマで撮影した。

(e) 金網の変位量

トータルステーションによるトラバース測量で測定した。

3.6 実験結果と考察

ポケット式落石防護柵の実物大衝突実験は、緩衝装置の効果や挙動の相違を確認するため、緩衝装置を設置しない型式を標準型、設置する型式を高エネルギー吸収型として、実験ケースを設定した。実験ケースは、重錘の衝突エネルギーを変えて、標準型 2 ケース、高エネルギー吸収型 4 ケース、計 6 ケースとした。



○ : U 型緩衝装置

○ : R 型緩衝装置

図-13 滑車装置と緩衝装置の設置箇所

表-4 実験ケースの各種条件と結果

実験 No.	構造形式	緩衝装置 の形式	重錘の 質 量 m [kg]	重錘の 落下高 H [m]	重錘の衝突 エネルギー E_w [kJ]	重錘の 最大 加速度 α_{\max} [m/s ²]	重錘の衝突速度			ワイヤロープの 最大張力 t_{\max} [kN] (発生位置)
							理論値 ($\sqrt{2gH}$) V_t [m/s]	実験値 ($\int \alpha dt$)		
								V_a [m/s]	$V_{a \max}$ [m/s]	
1	標準型	無	1700	6.0	100.0	97.5	10.84	10.60	11.69	112.1 (I)
2				8.0	133.3	100.1	12.52	12.15	12.98	152.4 (I)
3	高エネルギー 吸収型	R型	2500	7.0	171.5	32.0	11.71	11.50	12.81	44.6 (I)
4				10.0	245.0	53.1	14.00	13.77	14.49	53.0 (I)
5		R型とU型		15.0	367.5	62.8	17.15	16.90	17.21	59.9 (D)
6				20.0	490.0	69.7	19.80	19.45	19.56	58.9 (D)

実験 No.	実験後の状況									
1	著しい損傷無し. 衝突位置はほぼ目標位置. 重錘の回転と架台への衝撃は大きい. 最大ロープ張力は2段目横主ロープの右側で発生.									
2	著しい損傷無し. 衝突位置はほぼ目標位置. 重錘の回転と架台への衝撃は大きい. 最大ロープ張力は2段目横主ロープの右側で発生. 最大ロープ張力はほぼ破断強度に達しており, 標準型の構造としては適用限界に近い.									
3	著しい損傷無し. 衝突位置はほぼ目標位置. 緩衝装置の効果により, 重錘の回転と架台への衝撃は小さい. 最大ロープ張力は2段目横主ロープの右側で発生.									
4	著しい損傷無し. 衝突位置は2段目横主ロープ付近. 緩衝装置の効果により, 重錘の回転と架台への衝撃は小さい. 最大ロープ張力は2段目横主ロープの右側で発生.									
5	著しい損傷無し. 衝突位置は2段目横主ロープ付近. 緩衝装置の効果により, 重錘の回転と架台への衝撃は小さい. 最大ロープ張力は吊ロープの滑車装置定着部の右側で発生.									
6	著しい損傷無し. 衝突位置は2段目横主ロープ付近. 緩衝装置の効果により, 重錘の回転と架台への衝撃は小さい. 最大ロープ張力は吊ロープの滑車装置定着部の右側で発生. 重錘はロープが滑っている途中で地面へ衝突した.									

表-4 は, 実験ケースそれぞれの条件と結果を示している. 表において, 重錘の落下高は, 落下開始前の重錘底面から供試体の落下目標位置までの高さである. また, 重錘の衝突エネルギーは, (3)式で得た値を示している.

$$E_w = m \cdot g \cdot H \quad (3)$$

ここに, E_w : 重錘の衝突エネルギー (kJ)

m : 重錘の質量 (ton)

g : 重力加速度 (9.8m/s²)

H : 重錘の落下高 (m).

重錘の最大加速度は, 重錘に取り付けた 3 軸加速度計で得た X, Y, Z 軸の測定値より合成加速度を求め, 最大値を示している. 重錘の衝突速度は, $\sqrt{(2gH)}$ から求めた速度 V_t を理論値, 落下方向 (Z 軸) の重錘加速度を時間で積分して求めた速度および変位において, 変位が落下高に等しくなる時刻の速度 V_a ならびに最大速度 $V_{a \max}$ を実験値として併記している. この理論値と実験値は, ほぼ近似していることから, 加速度計で得られる測定値は, 比較的精度が高い. ワイヤロープの最大張力は, U ボルトのひずみから最大値を抽出し, 発生位置と併せて示している.

(1) 標準形 (No. 1 と No. 2) について

No.1 と No.2 は, 緩衝装置を設置していない標準型の実験である. 標準型は, 落石対策便覧に準じた設計計算に基づいて, 落石エネルギーの適用限界を最大 130kJ と

している. 衝突エネルギーは, No.1 は標準型の適用限界に対して 75%相当の 100kJ, No.2 は設計計算による標準型の適用限界に相当する 133.3kJ とした.

No.2 については, ワイヤロープの最大張力 152.4kN が, 2 段目の横主ロープの右側 (I 点) で発生した. この値は, 横主ロープに用いたワイヤロープの公称破断強度 (157kN) に近く, 衝突エネルギーがもう少し大きければ, 横主ロープが破断していたものと推察する. このことから, 標準型の落石エネルギーの適用限界は, 概ね妥当であると言える. また, No.1 と No.2 では, 重錘は落下目標位置付近の金網に接触し, 滑り落ちるようにして 2 段目の横主ロープに衝突し, その直後から回転を始め下方へ誘導される. この 2 ケースでは, 2 段目の横主ロープに衝突した直後における重錘の回転と架台への衝撃が大きい. これについて, 重錘は線速度エネルギーを増しながら自由落下し, 横主ロープへ衝突することで進行方向を変える. この時, 並進運動エネルギーは減少し, 回転運動エネルギーは増加していく. また, 衝撃を受けたワイヤロープは, 増大する張力を架台へダイレクトに伝える. 標準型の実験で, 重錘の回転と架台への衝撃が大きいのは, 緩衝装置を設けていないことから, 構造体の剛性が比較的高く, 重錘の衝突エネルギーを吸収しにくいと考える.

表－5 緩衝装置におけるワイヤロープの滑り量

実験 No.	R型緩衝装置におけるワイヤロープの滑り量 [mm]									U型緩衝装置におけるワイヤロープの滑り量 [mm]										
	N-1	N-2	O-1	O-2	P-1	P-2	Q-1	Q-2	Σ_R	A	E	F	G	H	I	J	K	L	M	Σ_U
3	105	110	100	80	470	460	320	350	1995	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
4	195	210	200	210	830	815	890	730	4080	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
5	340	170	220	220	85	185	905	710	2835	0	1180	0	0	0	0	940	810	0	0	2930
6	400	360	340	330	210	250	540	340	2770	0	0	0	0	0	0	1120	1080	195	450	2845

表－6 緩衝装置のエネルギー吸収量

実験 No.	エネルギー吸収量 E_f [kJ]		
	$\Sigma_R \times 28.0^*$	$\Sigma_U \times 30.0^*$	$E_f (E_f / E_w^*)$
3	55.9	----	55.9 (32.6%)
4	114.2	----	114.2 (46.6%)
5	79.4	87.9	167.3 (45.5%)
6	77.6	85.4	163.0 (33.2%)

28.0*, 30.0*: エネルギー吸収装置の平均滑り張力
 E_w^* : 表－4に示す衝突エネルギー

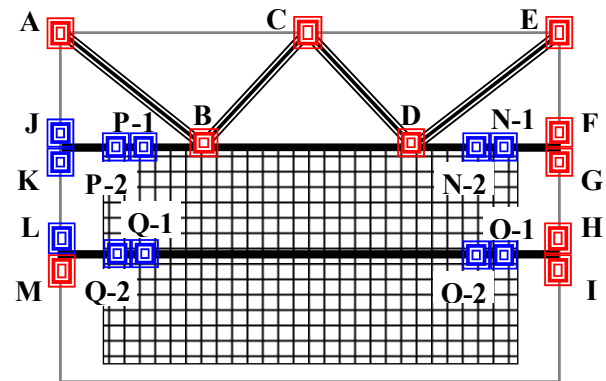
(2) 高エネルギー吸収型 (No. 3 から No. 6) について

No.3 から No.6 は、高エネルギー吸収型の実験であり、ケースに応じて、衝突エネルギー、横主ロープに設置する緩衝装置の型式を変えて行った。No.3 と No.4 は、横主ロープに R 型のみを設置したケースであり、衝突エネルギーは、それぞれ 171.5kJ, 245.0kJ とした。No.5 および No.6 は、R 型と U 型を設置したケースであり、衝突エネルギーは、それぞれ 367.5kJ と 490.0kJ とした。

No.3 および No.4 では、それぞれワイヤロープの最大張力 44.6kN および 53.0kN が、いずれも 2 段目の横主ロープの右側 (I 点) で発生した。No.5 および No.6 では、それぞれワイヤロープの最大張力 59.9kN および 58.9kN が、いずれも吊ロープにおける想定支柱位置の右側 (D 点) で発生した。

No.3 から No.6 のワイヤロープ最大張力は、ケースによって発生位置が異なるものの、値は 44.6～59.9kN の範囲にあり、標準型の 50%以下に減少している。また、衝突エネルギーの大きさに関わらずワイヤロープの張力は小さい他、2 段目の横主ロープに衝突した直後における重錘の回転や架台への衝撃も小さい。これは、緩衝装置が重錘の衝撃力を緩和し、衝突エネルギーを吸収する効果を有していることを示している。

表－5 および表－6 は、高エネルギー吸収型について、各測定位置の緩衝装置におけるワイヤロープの滑り量および滑り量と緩衝装置の平均張力を乗じて推定したエネルギー吸収量を示している。また、図－14 は、測定位置を示している。表－5 において、No.5 と No.6 は、R 型と U 型を設置した実験であり、それぞれの緩衝装置におけるワイヤロープの滑り量は、約 1:1 の割合である。また、表－6 において、緩衝装置のエネルギー吸収量は、55.9～167.3kJ であり、表－4 における重錘の衝突エネルギーに対しては、32.6%から 46.6%を占める。なお、NO.6



□: 張力と滑り量の測定位置, □: 滑り量の測定位置.

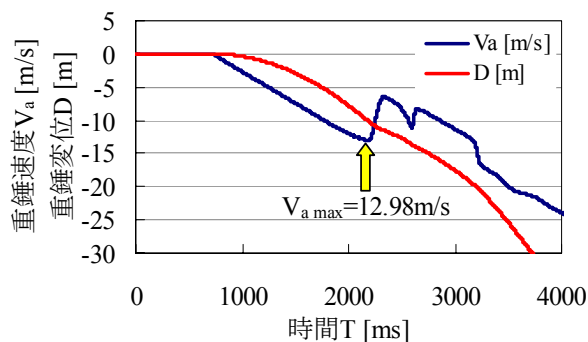
図－14 測定位置

は No.5 と比較して、衝突エネルギーが大きいにも関わらず、ワイヤロープの滑り量とエネルギー吸収量は小さくなっている。これは、緩衝装置内をワイヤロープが滑っている途中で重錘が地面に着地したためと推察する。

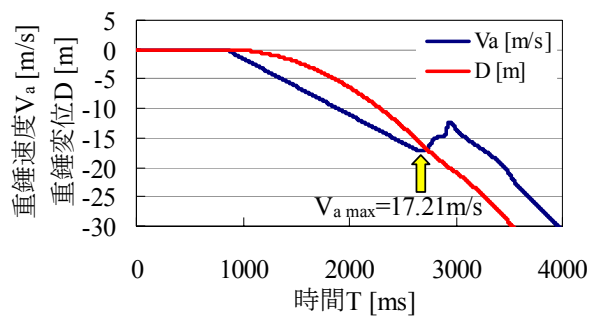
(3) 実験ケース No. 2 と No. 5 について

ここでは、標準型と高エネルギー吸収型を比較してみる。図－15 および図－16 は、それぞれ No.2 および No.5 における(a)重錘速度と変位の経時変化、(b)吊ロープ張力、(c)横主ロープ張力の経時変化を示している。表－4 における重錘の衝突速度の実験値は、(a)の値から抽出して記載した。全ての実験ケースで、重錘は最大速度に達した後、回転運動を開始するが、(a)に示している重錘の速度と変位は、加速度計により得た落下方向 (Z 軸) の加速度を時間で積分した値であるため、回転を開始した後の値は意味を持たない。なお、(a)のグラフと(b)および(c)のグラフにおける時間軸は、測定開始時刻が異なるため、同じ時刻を表していない。

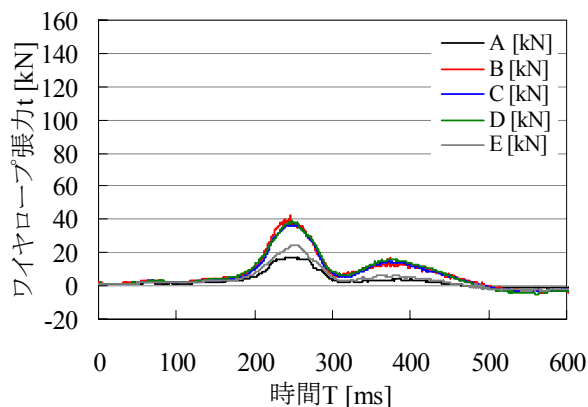
標準型の No.2 について、重錘速度は、概ね 2 段目の横主ロープに衝突した直後に最大となる。この時点の重錘変位は約 10.0m, 落下目標位置より約 2.0m 下がった位置である。その後、重錘は減速しながら回転を始め、さらに下方へ落下していく。吊ロープの最大張力は、滑車装置を設けている B, C, D 点で約 40kN 前後、定着部の A, E 点で約 20kN 前後であり、衝突エネルギーが小さい分、高エネルギー吸収型と比べて張力値は小さく、ばらつきも小さい。横主ロープの最大張力は、1 段目の横主ロープ右側の F, G 点で約 30～60kN, 2 段目の横主ロープ右側の H, I 点で約 90～150kN, 2 段目の横主ロープ左側の



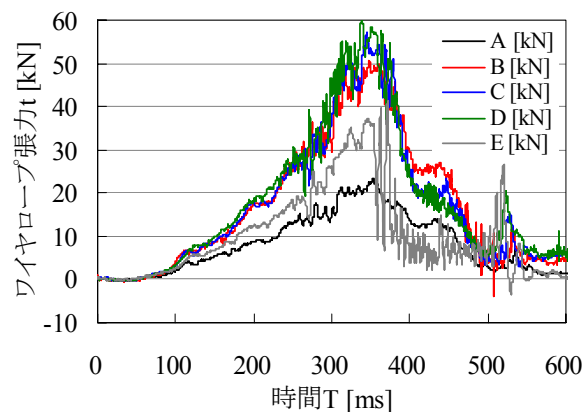
(a) 重錘速度と変位の経時変化



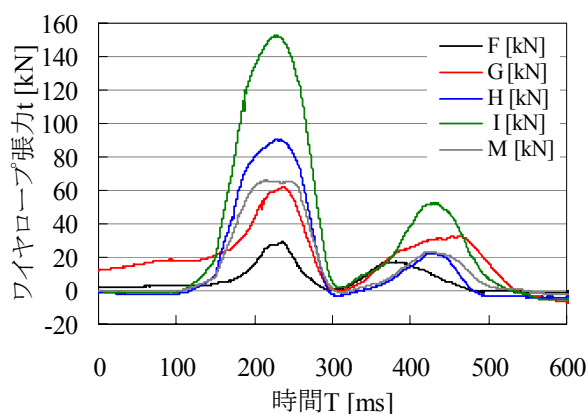
(a) 重錘速度と変位の経時変化



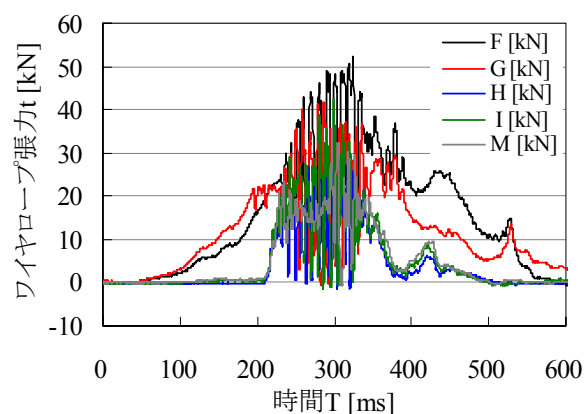
(b) 吊ロープ張力の経時変化 (A, B, C, D, E 点)



(b) 吊ロープ張力の経時変化 (A, B, C, D, E 点)



(c) 横主ロープ張力の経時変化 (F, G, H, I, M 点)
図-15 標準型の測定結果 (No.2)



(c) 横主ロープ張力の経時変化 (F, G, H, I, M 点)
図-16 高エネルギー吸収型の測定結果 (No.5)

M で約 65kN であり、ばらつきが非常に大きい。また、衝突エネルギーが比較的小さいにも関わらず、張力値は大きくなる傾向にある。

高エネルギー吸収型の No.5 について、重錘速度は、No.2 と同様、概ね 2 段目の横主ロープに衝突した直後に最大となる。この時点の重錘変位は約 16.2m、落下目標位置より約 1.2m 下がった位置である。その後、重錘は減速しながら回転を始め、さらに下方へ落下していく。吊ロープの最大張力は、B, C, D 点で約 50~60kN, A, E 点で約 20~40kN であり、衝突エネルギーが大きい分、標準型と比べて張力値は大きいものの、ばらつきは小さ

い。横主ロープの最大張力は、F, G 点で約 40~50kN, H, I 点で約 30~40kN, M 点で約 35kN 前後であり、標準型より衝突エネルギーは大きい張力値は小さく、ばらつきも小さい。なお、グラフにおいて、波形の振幅が激しいのは、緩衝装置内でワイヤロープが摩擦抵抗を受けながら滑っているためである。

No.2 と No.5 の測定結果から、吊ロープは張力が釣り合い、支持点ではほぼ均等の力が作用する、すなわち滑車の効果を確認できた。横主ロープは緩衝装置を設置しない場合、衝突エネルギーが小さいにも関わらず、ロープの張力とばらつきは大きくなる。一方、緩衝装置を設

表ー7 高速度カメラの画像解析によるエネルギー評価

実験 No.	重錘 質量 m [kg]	重錘 落下高 H [m]	評価時 位置 ^{*1} H_0 [m] (by Video ^{*2})	評価時に減 少した位置 エネルギー E_0 [kJ]	評価時 落下速度 V_0 [m/s] (by Video ^{*2})	運動 エネルギー E_1 [kJ]	重錘1辺 の長さ $2a=2b=2c$ [m]	重錘の 慣性 モーメント I [kg-m ²]	評価時 角速度 ω [rad/s] (by Video ^{*2})	回転 エネルギー E_2 [kJ]	吸収 エネルギー E_a ^{*3} [kJ]
1	1700	6.0	9.0	149.9	8.5	61.4	0.90	230	11.94	16.4	72.1
2	1700	8.0	11.0	183.3	10.6	95.5	0.90	230	12.57	18.2	69.6
3	2500	7.0	10.0	245.0	7.8	76.1	1.03	442	6.28	8.7	160.2
4	2500	10.0	13.0	318.5	12.2	186.1	1.03	442	7.85	13.6	118.8
5	2500	15.0	18.0	441.0	12.5	195.3	1.03	442	9.42	19.6	226.1
6	2500	20.0	23.0	563.5	14.5	262.8	1.03	442	7.54	12.6	288.1

*1：重錘の落下速度が最大に達した後で最も減速した位置，*2：高速度カメラの画像解析より，

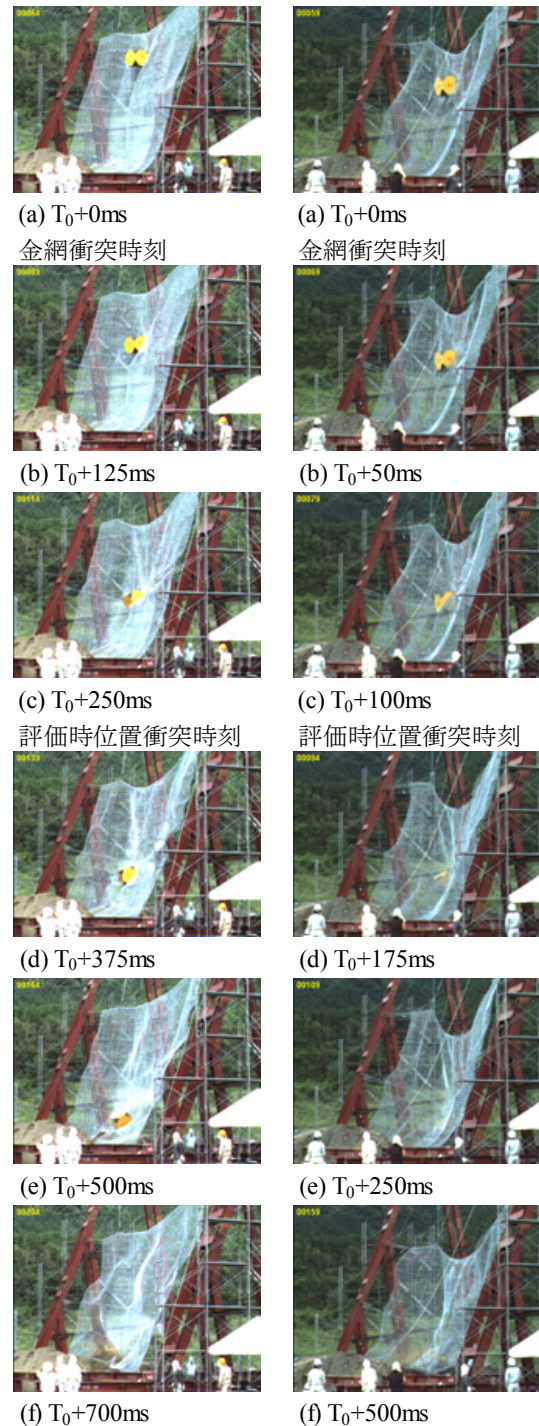
*3： $E_a = E_0 - (E_1 + E_2)$ 。

置した場合は，衝突エネルギーの大小に関係なく，ロープに作用する張力とばらつきを小さく抑えられることが確認できた。なお，No.2 と No.5 以外のケースでも，ほぼ同様の傾向が見られた。

(4) 高速度カメラの画像解析結果について

表ー7 は，高速度カメラの画像解析により，エネルギー評価を行った結果を示している。また，図ー17 は，高速度カメラの画像から抽出した供試体の変形状況を示しており，重錘が金網に衝突した時刻を 0ms としている。表ー7 において，重錘の落下速度が最大に達した後で，最も減速した位置をエネルギー評価の基準位置とし，これを評価時位置と呼ぶ。本実験において，重錘の落下速度は，2 段目の横主ロープに衝突した直後に最大速度に達し，若干の時間が経過してから最も減速する。図ー17 の(c)に示す評価時位置衝突時刻がそれにあたる。なお，画像解析による評価時位置は，ケースごとでやや異なり，重錘落下高から 3.0m 前後下方と読み取れるが，画像から正確な距離を特定するのは困難である。したがって便宜上，全ケースにおける評価時位置は，重錘落下高から 3.0m 下方として，評価時鉛直落下速度，評価時角速度より，評価時に減少した位置エネルギー，運動エネルギー，回転エネルギーをそれぞれ求めた。ここで，吸収エネルギーが位置エネルギーより下回っているのは，重錘を完全に捕捉して落下運動を停止させるのではなく，下方へ誘導させる構造体であるためである。したがって，本実験において，重錘は 2 段目の横主ロープに衝突し，さらに下方へ誘導されていく過程で，残存エネルギーを有しており，金網を上を回転しながら落下運動を継続し，最終的に地面に着地して重錘が停止する。

高速度カメラの画像解析結果より，標準型について，評価時に減少した位置エネルギーおよび吸収エネルギーは，No.1 で 149.9kJ および 72.1kJ (吸収率 48.1%)，No.2 で 183.3kJ および 69.6kJ (吸収率 38.0%) である。高エネルギー吸収型について，評価時に減少した位置エネルギーおよび吸収エネルギーは，それぞれ No.3 で 245.0kJ および 160.2kJ (吸収率 65.4%)，No.4 で 318.5kJ および 118.8kJ (吸収率 37.3%)，No.5 で 441.0kJ および 226.1kJ



図ー17 供試体の変形状況 (左 No.2, 右 No.5)

(吸収率 51.3%), No.6 で 563.5kJ および 288.1kJ (吸収率 51.1%) であり, 吸収率のばらつきが大きい. これは, 画像解析上の誤差を多く含んでいるなど, 解析精度の問題が大きいものと考えられる. また本実験において, 高エネルギー吸収型は標準型と比べて, 最大で約 3.8 倍の重錘衝突エネルギーに対応でき, エネルギー吸収量は最大で約 4 倍であることを確認できた.

4. まとめ

本研究では, 緩衝装置単体の性能確認実験およびポケット式落石防護網の実物大重錘衝突実験を行い, 以下のことがわかった.

- (1) 緩衝装置は単体の性能確認実験結果より, U 型, R 型ともにばらつきが少なく, 装置の製造精度は比較的高い. また, ワイヤロープの滑り量ならびに張力もほぼ一定であり, 安定したエネルギー吸収性能を有するものと評価できる.
- (2) 緩衝装置を落石防護工に適用するにあたり, 緩衝装置単体が吸収する落石エネルギー量を求めるため, 設計滑り張力を定めておく必要がある. 設計滑り張力は, エネルギー吸収量を過大に見積もらないように, 緩衝装置単体実験で得た平均張力を安全側に低減した値とし, U 型で 30kN, R 型で 28kN と定めるのが妥当である. ただし, ワイヤロープを定着するアンカーの設計アンカー力は, この値を用いた場合に危険側となるため, 実物大実験で確認された最大張力以上の値を用いるべきである.
- (3) 実物大実験で与えた重錘の衝突エネルギーの範囲内において, 緩衝装置を設置したケースのワイヤロープ張力は 60kN 以下であり, 衝突エネルギーの大きさとの関連性は見られず, 緩衝装置の滑り張力に関係する.
- (4) 実物大実験で用いた供試体は, 吊ロープの支柱想定位置に滑車装置を設けている. この滑車の効果により, 吊ロープの張力は釣り合い, 支持点ではほぼ均等の力が作用することが確認できた.
- (5) 実物大実験において, 緩衝装置を設けた供試体は, 緩衝装置を設けない場合と比較して, 最大で約 3.8 倍の重錘衝突エネルギーに対応でき, 最大で約 4 倍の吸収エネルギーを有することが確認できた.
- (6) 実物大実験において, 緩衝装置を設けた供試体は, 緩衝装置を設けない場合と比較して, ロープに作用する

張力を 50%以下に抑制することができる.

以上の結果より, ポケット式落石防護網に緩衝装置を設けることで, 従来の構造体より大きな落石エネルギーに対応できる. また, 緩衝装置の衝撃緩和効果により, ワイヤロープおよびワイヤロープを定着するアンカーへの作用力が軽減され, これら部材規格を下げるのが可能となることで, 安全性ならびに費用対効果の向上が期待できる. これらのことから, 落石対策が重要な課題とされる我が国において, 本構造体の実用化は, 有効な手段のひとつであると考えられる. 今後は, 本実験結果を基に, 非線形構造解析ソフト (LS-DYNA) を用いて, 実験の再現モデルの検討, 実構造物のモデル化, ならびに実構造物モデルによる落石衝突時の挙動解析を試みる予定である. また将来的には, シミュレートモデル作成にあたっての考え方, ならびにシミュレーションによる設計手法の確立に向け, 研究を推進したいと考えている.

謝辞: 本論文をまとめるにあたり, 金森藤平商事 (株) の一杉欣志氏, 仲筋康一氏および関係諸氏に多大なるご支援をいただきました. ここに記して謝意を表します.

参考文献

- 1) 日本道路協会: 落石対策便覧, 2000.6.
- 2) K. Maegawa and H. Yoshida: Collision Tests on a New Type of Rock Barrier, Proc. of EASEC-5, pp.1827-1832, 1995.
- 3) 前川 幸次, 田島 与典, 岩崎 征夫: PE ネットを用いた簡易型落石防護柵の重錘衝突実験, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.1615-1624, 2005.3.
- 4) 澤田 直子, 吉田 博, 藤井 智弘, 窪田 潤平, 前川 幸次: 緩衝金具を配置した落石誘導ワイヤネットシステムの実規模実験について, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.1853-1864, 2000.3.
- 5) 右城 猛, 西岡 南海男, 筒井 秀樹, 田中 登志夫: エネルギー吸収金具を付けた落石防護ネットの開発, 第 3 回南海地震四国地域学術シンポジウム, 2008.12
- 6) 河上 康太, 田島 与典, 前川 幸次: ポケット式落石防護網の落錘衝突シミュレーションに関する研究, 土木学会第 64 回年次学術講演会, I-568, 2009.9.
- 7) Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL): Guideline for the approval of rockfall protection kits, pp. 30, 2001.

(2009 年 9 月 24 日受付)